



POLITÉCNICO COLOMBIANO
Jaime Isaza Cadavid



RECUPERACIÓN DE COMPONENTES DE LLANTAS DESECHADAS: UN ENFOQUE SOSTENIBLE PARA LA PREPARACIÓN DE CATALIZADORES ACTIVOS EN LA SÍNTESIS FISCHER-TROPSCH

BOLETÍN DIVULGATIVO CAMER, DICIEMBRE DE 2024

AUTORES

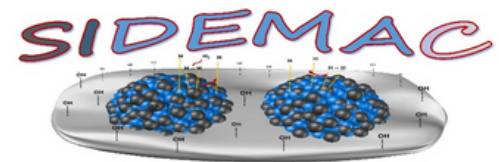
Alba N. Ardila A.^{1*}
Erasmus Arriola-Villaseñor¹
Melissa Arango Álvarez¹
Luis Alfredo Ruiz Zapata¹
Santiago Bedoya Betancur¹
Luz M. Ocampo-Carmona²
Sebastian Amar Gil¹
Rolando Barrera Zapata³

¹ Grupo de Investigación en Catálisis Ambiental y Energías Renovables, Facultad de Ciencias y Educación, Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Medellín, Colombia.

² Grupo de Investigación en Ciencia y Tecnología de Materiales (CTM), Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín - UNAL, Medellín, Colombia.

³ Grupo CERES Agroindustria e Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia UdeA, Medellín, Colombia.

Email contacto: anardila@elpoli.edu.co



Semillero de Investigación en Desarrollo de Materiales Catalíticos



Semillero de Investigación en Valorización de Residuos

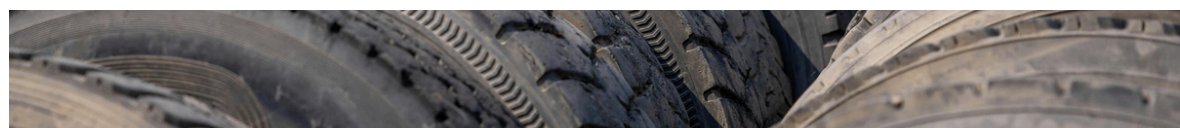


CTM

Ciencia y Tecnología de Materiales



CERES
Agroindustria & Ingeniería



CONTENIDO

	PÁG.
01 Llantas desechadas: una fuente potencial para la obtención integral de catalizadores carbonosos basados en hierro.	3
02 Caucho de llantas de desecho como fuente de carbón pirolítico y otras sustancias.	5
03 Hierro de llantas de desecho como precursor metálico.	7
04 La síntesis Fischer-Tropsch (FT) catalizada con materiales carbonosos de hierro.	7
05 ¿Qué estrategias estamos implementado en CAMER para la recuperación de 9 componentes de llantas desechadas para la preparación de catalizadores activos en la síntesis Fischer-Tropsch?	10
06 Nuestros proyectos de investigación, innovación y desarrollo tecnológico desarrollados para la recuperación de componentes de llantas desechadas para la preparación de catalizadores activos en la síntesis Fischer-Tropsch.	14
07 Descubre nuestras investigaciones y consulta nuestras publicaciones relacionadas con la recuperación de componentes de llantas desechadas para la preparación de catalizadores activos en la síntesis Fischer-Tropsch.	15
08 Nuestras alianzas.	19
09 Conclusiones.	21
10 Agradecimientos.	21
11 Referencias.	22



01

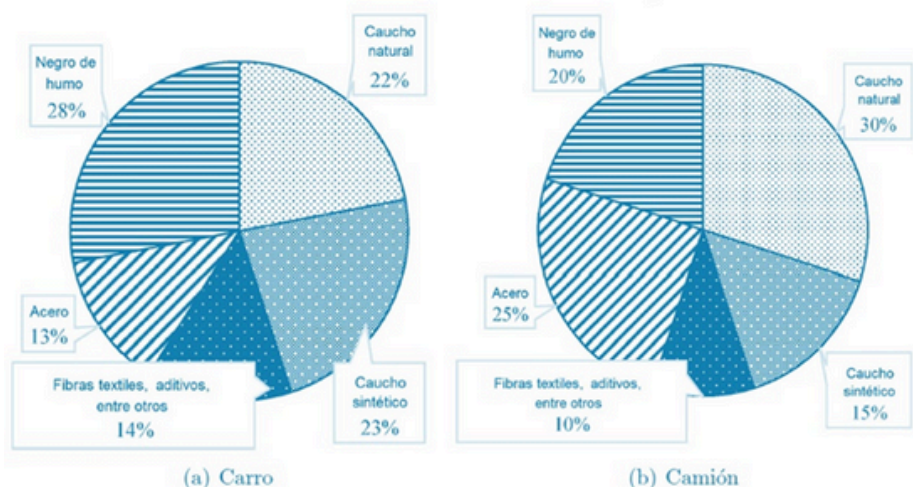
LLANTAS DESECHADAS: UNA FUENTE POTENCIAL PARA LA OBTENCIÓN INTEGRAL DE CATALIZADORES CARBONOSOS BASADOS EN HIERRO



Las llantas desechadas generan serios problemas ambientales debido a su durabilidad y composición compleja, que incluye caucho, textiles y acero. Su lenta degradación provoca la liberación de lixiviados tóxicos, microplásticos y gases peligrosos en caso de incendios. Además, acumulan agua, favoreciendo criaderos de mosquitos y aumentando el riesgo de enfermedades. Su disposición inadecuada en vertederos contribuye a la saturación de estos espacios, mientras que su desecho sin reciclaje representa una pérdida de recursos valiosos.

La composición típica de las llantas incluye caucho (40-48%), negro de humo o sílice (22-27%), materiales de refuerzo (5-25%) y aditivos (0-8%). Estas características las hacen candidatas para el reciclaje y recuperación de energía y materiales. Sin embargo, solo un pequeño porcentaje de los materiales recuperados, como el acero, se aprovecha a nivel global. En la **Figura 1** se muestra la composición típica del caucho de llantas desgastadas y de su acero residual.

Composición caucho de llanta



Composición acero residual de llanta

Elemento	Valor (%)
C	0.73
Si	0.22
Mn	0.67
P	0.026
Ni	0.023
Si	0.018
Cu	0.022
Mo	0.002
Cr	0.024
Fe	Balance

Figura 1. Composición típica del caucho de llantas desgastadas y de su acero residual.



En Colombia, la producción anual de llantas se estima en 200.000 unidades y su principal disposición consiste en quemarlas a cielo abierto con el fin de extraer el entramado metálico, el cual es rico en Fe, o incinerarlas en hornos industriales para aprovechar su contenido energético. Desde julio de 2010 mediante la Resolución 1457 se establecieron los Sistemas de recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas, de forma que obliga a los productores e importadores a disponer de condiciones para un manejo adecuado de estos desechos, sin embargo, todavía no se cuenta con una amplia infraestructura para el aprovechamiento de dicho residuo [2] . Gracias a la norma mencionada, en el país se han buscado diferentes alternativas de disposición de llantas residuales.

En la **tabla 1** detalla la composición de las llantas usadas, enfocándose en los contenidos de hierro y carbono, elementos clave para la síntesis de catalizadores carbonosos.

Tabla 1. Composición Típica de las Llantas y Uso Potencial.

componente	Porcentaje en peso (%)*	Fuente de	Uso potencial
Caucho (natural y sintético)	40-60	Carbono	Producción de carbón pirolítico como soporte para catalizadores
Negro de humo	30-40	Carbono adicional	Mejora de la estructura del carbón pirolítico y aumento de la conductividad eléctrica.
Hierro (cordones y alambres)	10-15	Hierro	Precursor para la formación de catalizadores metálicos soportados en carbón.
Textiles	5-10	Orgánicos	Posible conversión en biochar o residuos menores.
Componentes menores (azufre, aditivos)	5-10	Catalizadores	Mejora de las propiedades catalíticas, dependiendo del proceso.

* Valores aproximados, pueden variar según el fabricante y el tipo de llanta.

La composición de estos residuos evidencia que están constituidos principalmente por caucho, negro de humo, hierro y aditivos químicos, lo que les otorga un alto potencial de valorización para la obtención de materiales avanzados como adsorbentes, soportes catalíticos y catalizadores soportados.

CAUCHO Y NEGRO DE HUMO DE LLANTAS DE DESECHO COMO FUENTE DE CARBÓN PIROLÍTICO Y OTRAS SUSTANCIAS

El carbón activado es un material compuesto principalmente por carbono poroso carbonizado, activado mediante reacciones con gases o por adición de agentes químicos, antes o después del proceso de carbonización. Este material es altamente poroso y ampliamente usado en aplicaciones de purificación de agua, debido a que tiene la capacidad de remover especies contaminantes. El carbón activado puede obtenerse de distintas fuentes, donde destaca el carbón vegetal, residuos agroindustriales y residuos urbanos. Las llantas son uno de los productos con mayor fabricación a nivel mundial, representando una de las principales fuentes de carbono que se fabrica en grandes cantidades anualmente. Mediante el proceso de pirólisis es posible obtener char o carbón pirolítico de llanta, el cual puede ser empleado como soporte catalítico o adsorbente dependiendo de los tratamientos posteriores que se le realicen al material. Específicamente, el carbón pirolítico de caucho de llanta es rico en Zn y S, compuestos provenientes de distintos aditivos empleados en la elaboración de neumáticos, lo cual le provee al material una mayor efectividad en términos catalíticos. El caucho presente en las llantas, junto con el negro de humo, es rico en carbono, lo que lo convierte en una fuente ideal para la obtención de materiales carbonosos.

Pirólisis en atmósfera

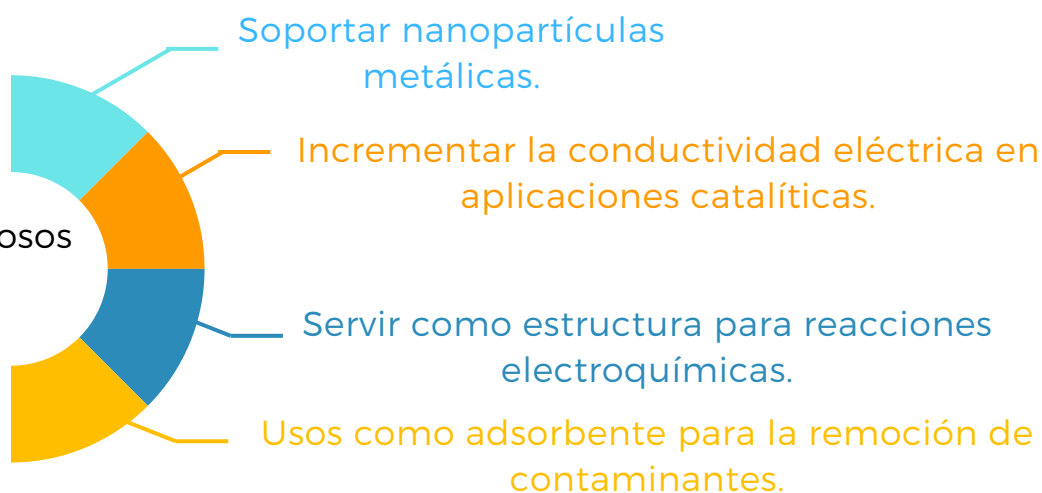
inerte: Proceso térmico que descompone el caucho y negro de humo, obteniendo un material carbonoso con propiedades ajustables según las condiciones (temperatura, tiempo de residencia).

Activación física o

química: Incrementa el área superficial y la porosidad, lo que es esencial para aplicaciones catalíticas en reacciones de adsorción y catálisis heterogénea



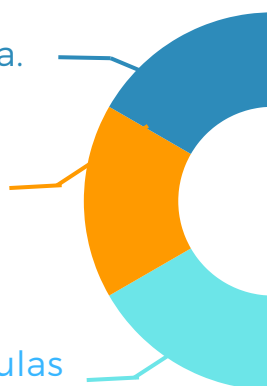
Los materiales carbonosos son ideales para



El carbón pirólítico derivado de llantas tiene la ventaja de ser sostenible y económico frente a otros precursores comerciales.

Alta estabilidad térmica.
Estructura porosa con área superficial elevada (>300 m²/g)

Capacidad para soportar nanopartículas metálicas.



Las principales propiedades deseables del carbón pirólítico son

El proceso de pirólisis es la una de las técnicas que más destaca dentro de estas rutas de valorización, donde este consiste en la descomposición térmica del caucho de la llanta en ausencia de oxígeno o con una cantidad limitada del mismo para producir gases (5-20 wt%), líquidos (40-60 wt%) y sólidos (30-40 wt%). Durante la pirólisis, las largas cadenas poliméricas del neumático se dividen en moléculas más pequeñas, este proceso es llevado a cabo normalmente entre 400 °C y 800 °C.

La corriente líquida puede ser empleada como combustible o como corriente de entrada en una refinería, esto debido a que está compuesta por productos químicos de interés, tales como benceno, tolueno, xileno y limoneno. La corriente gaseosa consiste generalmente en una mezcla de compuestos con moléculas pequeñas tales como H₂, hidrocarburos C1-C4, CO₂, CO y H₂S. La corriente sólida contiene un alto contenido de carbono, el cual puede ser usado para producir carbón activado. Por otro lado, el proceso de pirólisis se ve altamente influenciado por variables como tamaño de partícula, presión, tasa de calentamiento, tiempo, temperatura y tecnología.



03 HIERRO DE LLANTAS DE DESECHO COMO PRECURSOR METÁLICO

El hierro en las llantas, generalmente en forma de alambres o cordones, puede ser extraído mediante métodos mecánicos o magnetización posterior al triturado. Una vez recuperado, puede ser transformado mediante procesos químicos en precursores metálicos (por ejemplo, sales o óxidos de hierro). Este hierro es fundamental para:

Catalizadores tipo Fe/C: Los catalizadores carbonosos soportados en hierro tienen aplicaciones en procesos como:

- Reacciones de oxidación avanzada (p.ej., Fenton heterogéneo).
- Producción de hidrocarburos en reacciones Fischer-Tropsch.

Reducción catalítica de contaminantes: Desempeñan un papel crucial en la remediación ambiental, eliminando compuestos orgánicos persistentes. Este hierro puede ser:

- Depositado sobre el carbón pirolítico como catalizador soportado.
- Utilizado en reacciones de oxidación avanzada o síntesis de hidrocarburos

LA SÍNTESIS FISCHER-TROPSCH (FT) CATALIZADA CON MATERIALES CARBONOSOS DE HIERRO

04

La síntesis FT consiste en un proceso de polimerización superficial catalizada que permite transformar el gas de síntesis en hidrocarburos, parafinas, olefinas y alcoholes con muy bajo contenido de azufre y aromáticos. La mayoría de las reacciones presentes en este proceso son altamente exotérmicas, exceptuando la reacción de Boudouard (Tabla 2).

Tabla 2. Reacciones involucradas en la síntesis Fischer-Tropsch.

Reacciones principales	
Parafinas	$(2n + 1)H_2 + nCO \rightarrow C_nH_{2n+2} + nH_2O$
Olefinas	$2nH_2 + nCO \rightarrow C_nH_{2n} + nH_2O$
Alcoholes	$nCO + 2nH_2 \rightarrow C_nH_{2n+1}OH + (n - 1)H_2O$
Reacciones secundarias	
Reacción Boudouard	$2CO \rightarrow C + CO_2$
Reacción de desplazamiento agua-gas	$H_2O + CO \leftrightarrow CO_2 + H_2$
Modificaciones en la superficie del catalizador	
Oxidación/Reducción del catalizador	$MxOy + yH_2 \leftrightarrow yH_2O + xM$
	$MxOy + yCO \leftrightarrow yCO_2 + xM$
Formación de carburos	$yC + xM \leftrightarrow MxCy$

Elaboración propia con información de [6, 9, 10].

En el proceso FT se emplean diversos catalizadores, lo cual permite variar la selectividad y conversión del gas de síntesis según el material empleado; sin embargo, los catalizadores mayormente empleados están constituidos por metales de transición como el hierro, cobalto y rutenio. El rutenio, aunque es el más activo es poco práctico debido a su elevado costo y escasos. Por este motivo, los catalizadores basados en hierro y cobalto son comercialmente viables, donde el precio para el catalizador FT basado en hierro se estima entre 10 y 40 dólares por libra, mientras que el catalizador FT basado en el cobalto puede costar entre 60 y 100 dólares por libra.

Adicionalmente, el proceso FT puede ser clasificado según el rango de temperatura en el cual se opere el reactor: el proceso de síntesis Fischer-Tropsch a baja temperatura (LTFT) es llevado a cabo entre 200 a 280 °C, mientras que la síntesis Fischer-Tropsch a alta temperatura (HTFT) se da entre 300 a 350 °C [6]. En la **Tabla 3** se presentan las ventajas y desventajas respecto al uso de Fe como catalizador junto a los soportes normalmente empleados para la síntesis de este material en el proceso Fischer-Tropsch.

Tabla 3. Ventajas y desventajas de los catalizadores basados en hierro.

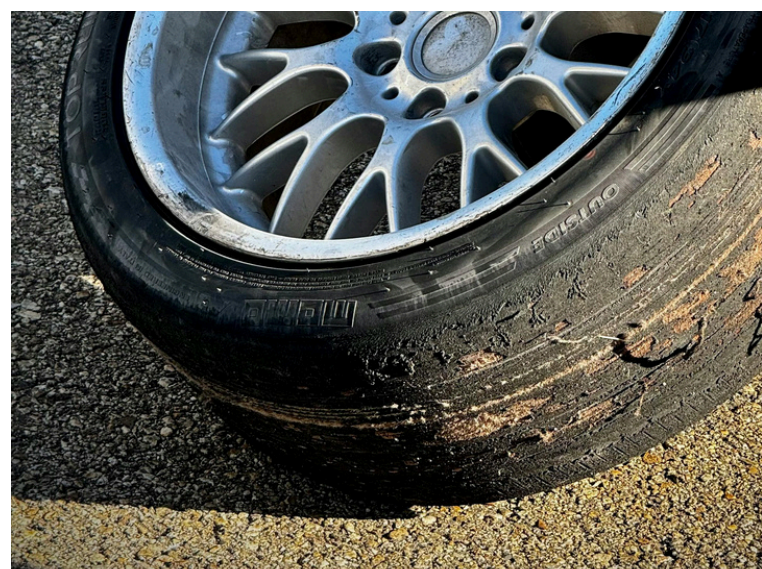
Material	Ventaja	Desventaja
Fase activa		
Fe	Bajo costo (10 - 40 USD/lb). Actividad en reacción de desplazamiento agua - gas. Selectividad hacia alcoholes de cadena larga. Selectividad hacia olefinas a relaciones elevadas de H ₂ /CO (>2). Operación en FTHT y FTLT.	Desactivación debido a la deposición de carbono en la superficie. Re-oxidación y/o transformación de las fases activas. Sinterización.
	Soporte	
Al ₂ O ₃	Materia prima comercial.	Formación de óxidos mixtos difícilmente reducibles.
TiO ₂	Alta dispersión de hierro.	
SiO ₂		
Carbón activado	Estabilidad térmica. Elevada área superficial. Alta dispersión de hierro. Obtenido de fuentes convencionales y alternativas (carbón mineral, caucho de llanta, residuos agroindustriales)	Grupos de carburo de hierro pirofóricos (formación de óxidos de hierro al exponerse el catalizador al aire). Costos elevados de materia prima comercial (carbón mineral)

Elaboración propia.

Durante la reacción Fischer-Tropsch sobre el catalizador a base de hierro se generan procesos de carburización inevitables los cuales contribuyen a la formación de hierro metálico, óxidos de hierro y carburos de hierro como Fe₂C, Fe_{2,2}C, Fe₇C₄, Fe₅C₂ y Fe₃C, siendo estas las especies más estables y comunes. La conversión del CO se asocia con la especie Fe₅C₂ (carburo de Hägg), mientras que la desactivación del catalizador se debe a la deposición de carbono sobre la superficie, formando especies Fe₃C (cementita).



El catalizador activo de Fe sólo se obtiene una vez realizado el proceso de reducción con hidrógeno en el período inicial de síntesis, formando las especies activas hierro metálico, carburos de hierro y carbón elemental. Este proceso se lleva a cabo a temperaturas cercanas a la establecida para la síntesis Fischer-Tropsch y presión atmosférica; el tiempo de reducción puede variar entre 1 a 24 horas según la relación molar de gas de síntesis empleada y condiciones de proceso establecidas.



En la **Tabla 4** se presentan algunos catalizadores Fisher-Tropsch reportados en la literatura. Se logra evidenciar como el catalizador de hierro soportado en óxido de aluminio se reporta como el material que presenta menor actividad en la síntesis de alcoholes de cadena larga, debido a la interacción que se genera entre la fase activa y el soporte. Además, se observa como los catalizadores soportados en carbón activado presentan alta conversión y selectividad hacia alcoholes, lo cual es asociado a la sinergia entre el soporte carbonoso y el hierro, aumentando de este modo la actividad catalítica del material.

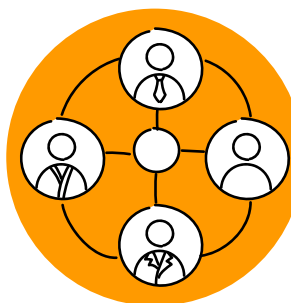
Tabla 4. Distribución de productos empleando catalizadores modificados Fischer-Tropsch.

Catalizador	T (°C)	P (bar)	GHSV (h ⁻¹)	H ₂ /CO	X _{CO} (%)	S _{HA} (%)
CuFe/SiO ₂	280	40	5000	2	40	40
K-CuFe/SiO ₂	320	50	6000	2	56	49
FeO	270	2	6000	2	11.8	7.1
15Co5Fe/AC	220	30	4000	1	18.8	17.6
Fe/AC	210	1	2000	2	20.8	19.2
Cu _{1,5} Fe/AC	210	1	2000	1	23.6	21.2
Fe/Al ₂ O ₃	275	8	4000	2	1	6
Fe/AC	275	8	-	1	80	26

S_{HA}: Selectividad hacia alcoholes de cadena larga, AC: Carbón activado, GHSV: Velocidad espacial, X_{CO}: Conversión de monóxido de carbono. Elaboración propia.

05

¿QUÉ ESTRATEGIAS ESTAMOS IMPLEMENTANDO EN CAMER PARA LA RECUPERACIÓN DE COMPONENTES DE LLANTAS DESECHADAS PARA LA PREPARACIÓN DE CATALIZADORES ACTIVOS EN LA SÍNTESIS FISCHER-TROPSCH?



HEMOS ESTABLECIDO ALIANZAS ESTRATÉGICAS CON EMPRESAS RECICLADORAS Y TRANSFORMADORAS DE LLANTAS DESECHADAS

Trabajamos en colaboración con las empresas Green Delta S.A.S. y Ekogroup Colombia S.A.S., quienes suministran las llantas desechadas, ya que ellas se encargan de la recolección, transporte y recepción de los neumáticos usados, cumpliendo con la normatividad colombiana (Resolución 1457 de 2010, Capítulo III de las obligaciones de los productores, literales c y d).

HEMOS OBTENIDO CARBÓN PIROLÍTICO CON ALTA ÁREA SUPERFICIAL



En un avance innovador, hemos desarrollado un proceso eficiente para convertir llantas de desecho en carbón pirolítico con potencial para aplicaciones avanzadas. Siguiendo metodologías optimizadas, el caucho reciclado fue sometido a un tratamiento ácido para eliminar impurezas y rellenos inorgánicos, seguido de un cuidadoso proceso de pirólisis en un reactor tubular bajo flujo controlado de nitrógeno. La estrategia incluyó rampas de calentamiento específicas que promovieron la degradación de polímeros y maximizaron la superficie del carbón obtenido. Este logro abrió nuevas posibilidades para la valorización de residuos, transformando un grave problema ambiental en un recurso valioso. En la **figura 2**, se muestra el esquema de síntesis de carbón pirolítico a partir de llantas de desecho.

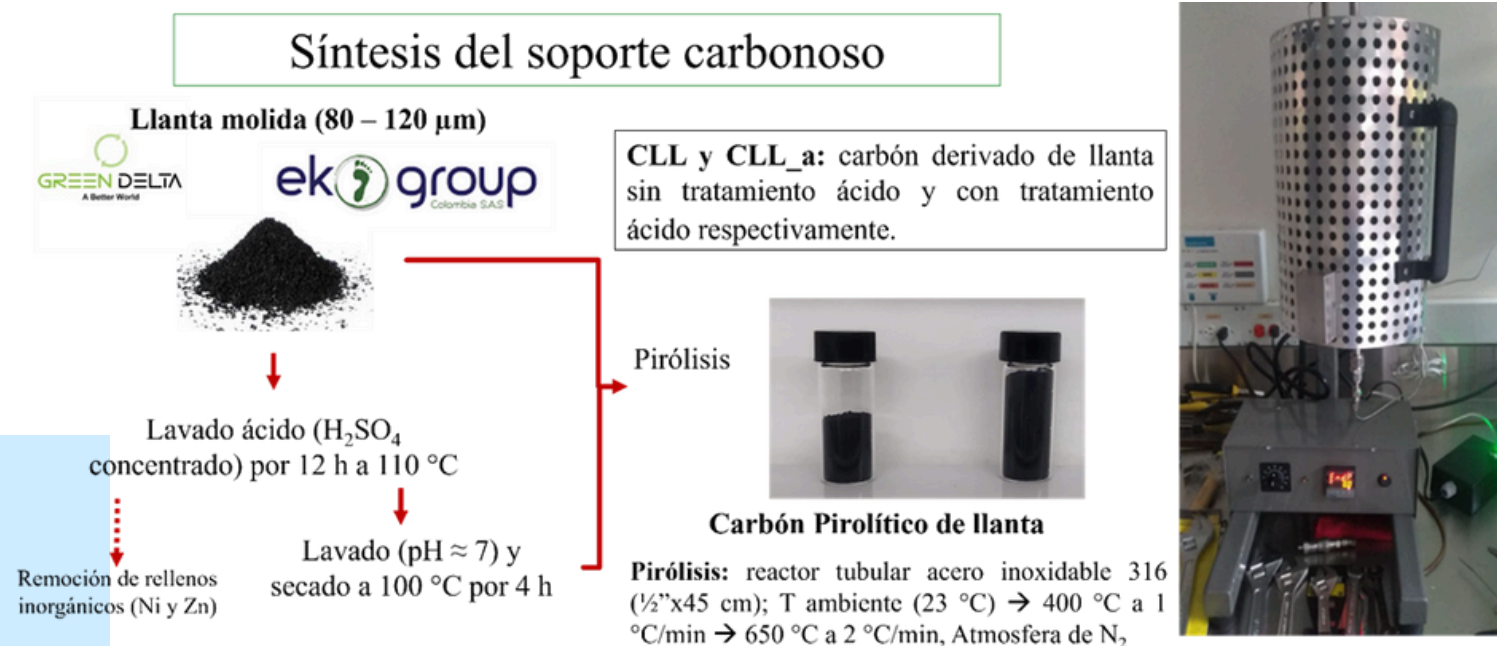


Figura 2. Esquema de síntesis de carbón pirolítico a partir de llantas de desecho.

Los resultados destacan un rendimiento promedio para la obtención de materiales carbonosos del 42.39% para caucho residual y un 64% para caucho tratado con ácido sulfúrico, ambos con desviaciones mínimas (1.25% y 1.32%, respectivamente), garantizando un proceso altamente reproducible.

El análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM) reveló alta porosidad en los carbones sintetizados y bajos niveles de materiales inorgánicos residuales. El carbón obtenido tras el tratamiento ácido alcanzó un área superficial de 209 m^2/g , alineándose con valores de referencia (100-300 m^2/g), lo que resalta su potencial para aplicaciones avanzadas en remediación y catálisis. Nuestras investigaciones reafirman el compromiso con la economía circular, transformando llantas en desuso en materiales con valor agregado y un impacto ambiental positivo.

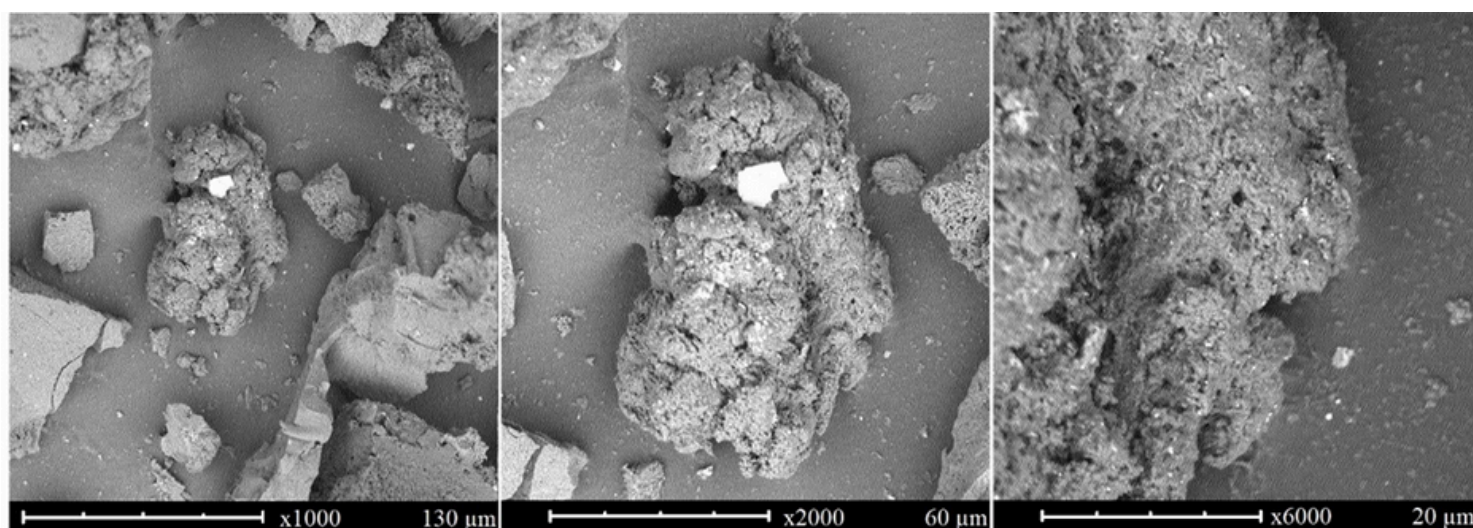
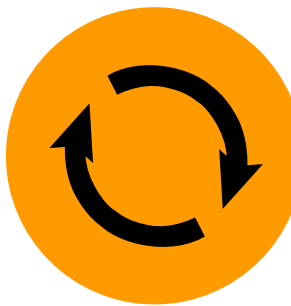


Figura 3. Micrografías SEM del carbón derivado de llanta obtenido a través de tratamiento ácido (CLL_a); magnificación X1000, X2000, X6000.



HEMOS TRANSFORMADO ALAMBRES DE LLANTAS DESECHADAS EN UNA SAL PRECURSORA DE HIERRO DE ALTA PUREZA

En un innovador proceso de reciclaje, logramos sintetizar sulfato de hierro heptahidratado ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) a partir del acero residual de llantas desechadas. Utilizando ácido sulfúrico y un agente oxidante, el procedimiento produjo un rendimiento promedio del 87.13%, comparable con valores reportados para residuos metalúrgicos (94%).

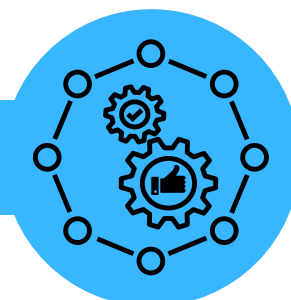
La sal obtenida presenta características físicoquímicas similares a las de un sulfato de hierro comercial, con un contenido de hierro cercano al 20% y una humedad del 44%, confirmando su estado heptahidratado. Análisis termogravimétrico y espectroscopía infrarroja demostraron que ambos materiales tienen propiedades equivalentes, destacando su estabilidad térmica y las transiciones características entre fases hidratadas.

Este avance destaca el potencial de los residuos de neumáticos para generar materiales de alto valor agregado, impulsando la economía circular y reduciendo el impacto ambiental de los desechos industriales. En la **figura 4**, se muestra el esquema de síntesis de sulfato de hierro a partir de alambres de llantas de desecho.



Figura 4. Esquema de síntesis de sulfato de hierro a partir alambres de llantas de desecho.

HEMOS AVANZADO EN EL USO INTEGRAL DE LLANTAS DE DESECHO PARA LA SÍNTESIS DE CATALIZADORES DE FISCHER-TROPSCH



Se ha desarrollado catalizadores basados en hierro soportado en carbón pirolítico derivado de llantas de desecho (CLL_a), mostrando resultados prometedores para la síntesis Fischer-Tropsch. Utilizando el método de impregnación húmeda, lograron preparar catalizadores con un contenido de hierro de hasta 5%, optimizando las condiciones de síntesis y reacción en un reactor de lecho fijo.

Se obtuvo un catalizador con 5% de hierro el cual mostró una selectividad superior hacia alcoholes de cadena larga (17.62%) en comparación con un catalizador comercial (0.70%), gracias a la presencia de elementos como Cu, Zn y Mn, y características específicas de la superficie del material.

Este avance no solo plantea un nuevo uso para las llantas desechadas, sino que también abre camino hacia procesos más sostenibles en la producción de combustibles y productos químicos de alto valor. En las **figuras 5 y 6**, se ilustra el esquema de síntesis de catalizadores de hierro soportado en carbón pirolítico a partir de llantas de desecho y el sistema usado para su evaluación catalítica en la síntesis FT.

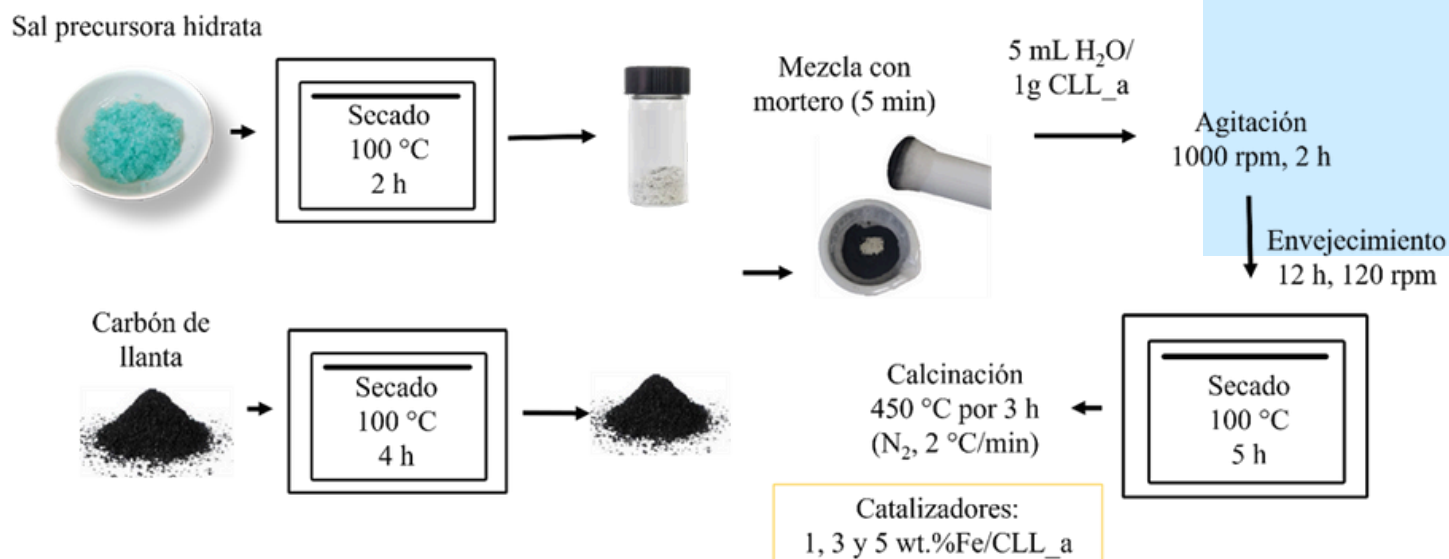


Figura 5. Esquema de síntesis de catalizadores de hierro soportado en carbón pirolítico a partir de llantas de desecho.

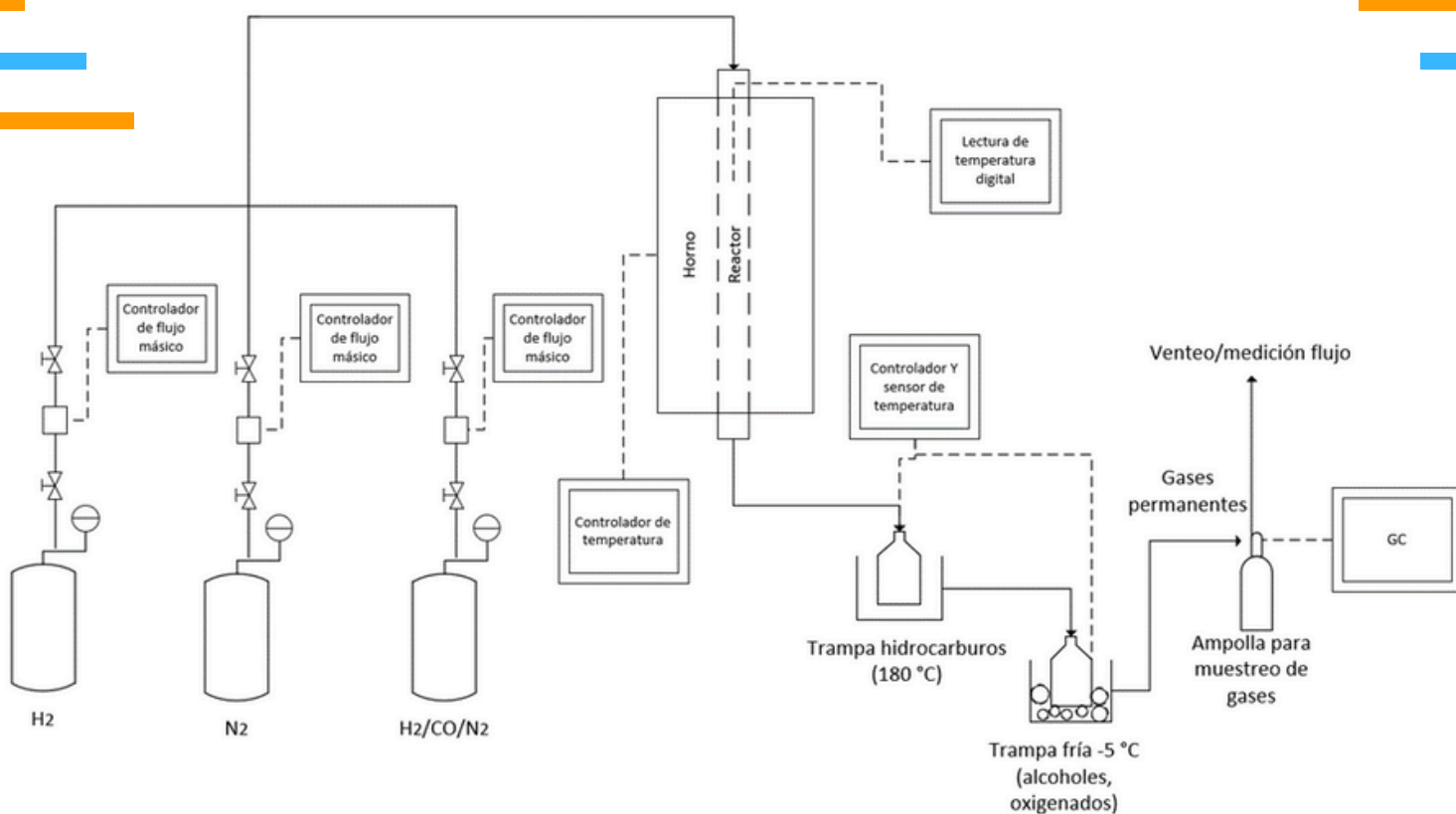


Figura 6. Esquema del montaje experimental para la síntesis Fischer-Tropsch.

NUESTROS PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO DESARROLLADOS PARA LA RECUPERACIÓN DE COMPONENTES DE LLANTAS DESECHADAS PARA LA PREPARACIÓN DE CATALIZADORES ACTIVOS EN LA SÍNTESIS FISCHER-TROPSCH.



1. Aprovechamiento y valorización de residuos de llantas: Una alternativa ambiental y económicamente viable. Ardila A. Alba N., Arriola V. Erasmo, Hincapié-Triviño Gina M., Álvarez G. Álvarez G. William F., Hurtado J. Daniela, Madrid A. Alexander, Muñoz R. Alejandro, Berrio M. Eliana, Aguilar L. Leidy Jazmín. Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Ekogroup. 20 Diciembre de 2016- Diciembre 20 de 2018.

2. Aprovechamiento y valorización de residuos de llantas usadas: Una alternativa ambiental y económicamente viable. Ardila A. Alba N., Gustavo Fuentes Zurita, Rolando Barrera Zapata, Erasmo Arriola Villaseñor, Sebastian Amar Gil, Alfonso Enrique Ramírez Sanabria, Leidy Jazmin Aguilar Lagos. Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Universidad Autónoma Metropolitana de Iztapalapa, Universidad de Antioquia, Ekogroup, Universidad del Cauca. 1 de Octubre de 2018- 1 de Octubre de 2019.

3. Desarrollo de catalizadores a partir de llantas residuales para la síntesis de alcoholes de cadena larga. Sebastián Amar Gil, Rolando Barrera Zapata, Alba Nelly Ardila Arias. Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid. Agosto 5 de 2020- Junio 15 de 2021.

4. Aprovechamiento de acero y caucho de llantas residuales para el desarrollo de catalizadores de hierro. Alba Nelly Ardila Arias, Gustavo Fuentes Zurita, Rolando Barrera Zapata, Erasmo Arriola Villaseñor, Sebastián Amar Gil. Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Febrero 15 de 2021- Agosto 15 de 2022.

5. Valorización integral de residuos postconsumo e industriales para el desarrollo de materiales con potencial catalítico bajo un enfoque de economía circular. Luz Marina Ocampo Carmona, Jorge Andrés Moreno Lopera, Pedro Luis Delvasto Angarita, Leidy Hoyos Giraldo, Erasmo Arriola Villaseñor Alba Nelly Ardila Arias. Convocatoria 890 para el fortalecimiento de CTel en Instituciones de Educación Superior (IES) Públicas, Mecanismo 1. 2021, Junio 30 de 2022 a Junio 30 de 2025.

DESCUBRE NUESTRAS INVESTIGACIONES Y CONSULTA NUESTRAS PUBLICACIONES RELACIONADAS CON LA RECUPERACIÓN DE COMPONENTES DE LLANTAS DESECHADAS PARA LA PREPARACIÓN DE CATALIZADORES ACTIVOS EN LA SÍNTESIS FISCHER-TROPSCH.

Journal of Material Cycles and Waste Management
https://doi.org/10.1007/s10163-023-01591-1

ORIGINAL ARTICLE



Obtaining and characterization of catalytic materials from waste tires for the Fischer–Tropsch process

Sebastian Amar-Gil^{1,2} · Alba N. Ardila-Arias² · Rolando Barrera-Zapata¹

Received: 11 July 2022 / Accepted: 5 January 2023
© Springer Nature Japan KK, part of Springer Nature 2023

Abstract

In this contribution, the preparation of iron-based catalysts from waste tires is reported. Waste steel from disused tires was used as feedstock to obtain iron sulfate (active phase precursor), while tire rubber was transformed by pyrolysis into carbonaceous material (catalyst support). Thus, catalysts were prepared from waste tires and characterized by different techniques. For comparison, additional catalysts were prepared using commercial iron sulfate ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) as the active phase precursor, and commercial activated carbon (derived from mineral coal) as support. The yield toward tire-derived carbon was about $64.6 \pm 1.3\%$ with respect to the tire used, while the yield toward iron salt was about $87.1 \pm 2.8\%$. The synthesized catalysts presented similar characteristics to catalysts prepared with commercial materials, presenting groups such as aromatic compounds (C=C), carbonyl group (C=O) and hydroxyl groups (-OH), in addition to the presence of magnetite, amorphous graphitic carbon and ZnS in their structure.

Keywords Iron-based catalysts · Waste valorization · Waste tires

Introduction

Synthetic fuels can be obtained from synthesis gas by the Fischer–Tropsch (FT) process and can often be used as an alternative to fossil fuels for power generation [1–3]. Different metals can be used as catalysts in FT processes, with Fe being one of the most widely used in the industry due to its catalytic activity and relatively low cost compared to other metals [4, 5]. Fe-based catalysts are very active for water gas shift reaction ($\text{H}_2\text{O} + \text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$) and can be used for the transformation of synthesis gas with low H_2/CO molar ratio ($\text{H}_2/\text{CO} = 1$) and temperatures between 200 and 350 °C [6]. The catalytic phenomenon in the FT reaction leads to the formation of different Fe species during the process, including iron oxides and iron carbides such as Fe_3C , Fe_5C_2 , and Fe_7C_8 , among others [7, 8]. Regarding the production of Fe-based catalysts, they are often obtained from commercial salts containing the active phase (for example, iron sulfates such as $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ or iron nitrates such as $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) by means of impregnation and precipitation processes, using as support solids such as Al_2O_3 , SiO_2 or zeolites [9]. Carbon-based supports such as nanotubes, nanofibers, mesoporous carbons, and activated carbon are also used. Carbonaceous supports are desirable, because the use of metallic supports can allow unwanted Fe-metal interactions, thus facilitating the formation of oxides that are difficult to reduce and that affect the activity of the catalyst [10]. Among the different carbon-based supports, activated carbon stands out for its mechanical resistance, thermal stability, high surface area and mesoporous—microporous structure [11–13]. On the negative side, obtaining activated carbon from mineral coal can be economically and environmentally unfavorable. For this reason, various investigations have focused on obtaining activated carbon from alternative sources such as residual rubber extracted from tires at the end of their life cycle, among others [14].

In that sense, when there are not adequate final disposal policies for disused tires, they can generate serious environmental and even public health problems [15]. In countries such as the US, the generation of this waste is around

✉ Sebastian Amar-Gil
sebastian.amar@udea.edu.co

¹ Grupo CERES Agroindustria e Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia UdeA, Calle 70 No. 52-21, 050010 Medellín, Colombia

² Research Group in Environmental Catalysis and Renewable Energies, Facultad de Ciencias Básicas Sociales y Humanas, Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Apartado Aéreo 49-32, 050010 Medellín, Colombia

Published online: 01 March 2023



[VER ARTICULO](#)



[VER ARTICULO](#)



Obtención y caracterización de sulfato de hierro (II) heptahidratado a partir de alambre de acero proveniente de llantas residuales

Obtaining and characterization of iron (II) sulfate heptahydrate from steel wire derived from waste tires

Sebastián Amar Gil Alba Ardila Arias
Posttécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Colombia
Rolando Barrera Zapata
Universidad de Antioquia, Colombia

OPEN ACCESS

Recibido: 16/10/2023
Aceptado: 11/12/2023
Publicado: 15/01/2024

Correspondencia de autores:
sebastian.amar@udea.edu.co



Copyright 2020
by Investigación e
Innovación en Ingenierías

Resumen

Objetivo: Estudiar el aprovechamiento de alambre de acero residual de llantas en desuso para la obtención de sulfato de hierro hidratado. **Metodología:** El proceso consistió en la disolución ácida de las fibras de acero residual con ácido sulfúrico comercial y la posterior síntesis de los cristales de sulfato de hierro utilizando etanol como agente oxidante. **Resultados:** La sal obtenida presentó humedad del 44% y estado de hidratación cercano a 7 (6.64). Mediante análisis FTIR se evidenció en la sal la presencia de bandas características de absorción entre 900–1300 cm^{-1} , 1500–1700 cm^{-1} y 3100–3500 cm^{-1} correspondientes a los grupos SO_4^{2-} , H_3O^+ y OH, respectivamente. Por otro lado, la sal sintetizada presentó alto contenido en Fe (20%) y trazas de metales como Mn, Mo, Ni y Zn, atribuidos a la composición del alambre de acero de las llantas. **Conclusiones:** De acuerdo con los resultados, se logró evidenciar que la sal sintetizada presenta propiedades similares a un sulfato de hierro heptahidratado comercial, cuya obtención a partir de llantas en desuso no se encuentra reportada. Por tal razón, la presente contribución representa una alternativa potencial para la valorización de llantas residuales.

Palabras clave: Sulfato de hierro heptahidratado, Acero residual, Llantas usadas, Valorización de residuos.

Abstract

Objective: To study the utilization of residual steel wire from disused tires to obtain iron sulfate hydrate. **Methodology:** The process consisted of the acid dissolution of the residual steel fibers with commercial sulfuric acid and the subsequent synthesis of iron sulfate crystals using ethanol as oxidizing agent. **Results:** The salt obtained had a moisture content of 44% and a hydration state close to 7 (6.64). FTIR analysis showed the presence of characteristic absorption bands between 900–1300 cm^{-1} , 1500–1700 cm^{-1} and 3100–3500 cm^{-1} corresponding to SO_4^{2-} , H_3O^+ and OH groups, respectively. Furthermore, the synthesized salt presented high Fe content (20%) and traces of metals such as Mn, Mo, Ni and Zn, attributed to the composition of the steel wire of the tires. **Conclusion:** According to the results, it was possible to demonstrate that the synthesized salt has properties similar to a commercial iron sulfate heptahydrate, whose production from disused tires has not been reported. Therefore, this contribution represents a potential alternative for the valorization of used tires.

Keywords: Iron sulfate heptahydrate, Residual steel, Used tires, Waste valorization.



Asociación Colombiana de Instituciones de Educación Superior con Formación Técnica Profesional, Tecnológica o Universitaria

Certifica que:

AMAR GIL SEBASTIAN
1037648978

Participó en calidad de **PONENTE** en modalidad virtual, con el proyecto titulado: "Catalizadores a partir de llantas residuales para la síntesis de alcoholes de cadena larga", en el espacio académico:



los días 3 y 4 de septiembre de 2020.

Hernán Mauricio Chaves Ardila
Presidente Nacional de ACIET

Javier Duván Amado Acosta
Director Ejecutivo ACIET



III SIMPOSIO INTERNACIONAL 2022

CATALISIS AMBIENTAL Y ENERGÍAS RENOVABLES

CONSTANCIA

Rolando Barrera Zapata

Por la presentación **ORAL** del trabajo titulado:

"Desarrollo de catalizadores basados en hierro soportados en carbón derivado de llanta y su aplicación en la síntesis Fischer-Tropsch"

Organizado por:

El Grupo de Investigación en Catálisis Ambiental y Energías Renovables **CAMER**, de la Facultad de Ciencias Básicas, Sociales y Humanas. Celebrado del 13 al 17 de junio de 2022 en la modalidad virtual en la Ciudad de Medellín, Colombia.

Cesar Iván Navarro Criado
Vicerrector de Extensión E,
Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid

Alba Nelly Ardila Arias
Líder Grupo de Investigación en Catálisis
Ambiental y Energías Renovables



La Academia de Catálisis A.C. Otorga la presente: **CONSTANCIA**

A: Sebastian Amar Gil, Alba Nelly Ardila Arias and Rolando Barrera Zapata

Por la presentación oral titulada:

OBTENCIÓN DE MATERIALES CATALÍTICOS A BASE DE HIERRO A PARTIR DE LLANTAS RESIDUALES Y SU POSIBLE APLICACIÓN EN SÍNTESIS FISCHER-TROPSCH

Presentada durante el VIII Congreso Internacional y XVII Congreso Mexicano de Catálisis, que se llevó a cabo del 7 al 12 de noviembre del 2021 en San Luis Potosí, S.L.P.

Jorge Noé Díaz de León Hernández
Presidente del Comité Científico

María Guadalupe Cárdenas Galindo
Presidente del Comité Organizador

"Nuevas fronteras en Catálisis"





Encuentro Departamental de Semilleros de Investigación
-Nodo Antioquia 2021-
VIRTUAL

El **Nodo Antioquia** adscrito a **Redcolsi** hace constar que

JUAN DAVID MARTINEZ CAÑAS

identificado con número:

1128472662

participó en calidad de:

PONENTE

LUZ MERY HERRERA GALEANO
COORDINADORA NODO ANTIOQUIA
Firmado digitalmente el día 17 de junio de 2021.



POLITÉCNICO COLOMBIANO
JAIME ISAZA CADAVID



III SIMPOSIO INTERNACIONAL 2022
CATÁLISIS AMBIENTAL Y ENERGÍAS RENOVABLES

CONSTANCIA

Sebastian Amar Gil

Por la presentación **ORAL** del trabajo titulado:

“Desarrollo de catalizadores basados en hierro soportados en carbón derivado de llanta y su aplicación en la síntesis Fischer-Tropsch”

Organizado por:

El Grupo de Investigación en Catálisis Ambiental y Energías Renovables **CAMER**, de la Facultad de Ciencias Básicas, Sociales y Humanas.
Celebrado del 13 al 17 de junio de 2022 en la modalidad virtual en la Ciudad de Medellín, Colombia.

Cesar Iván Navarro Criado

Vicerrector de Extensión E,
Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid

Alba Nelly Ardila Arias

Líder Grupo de Investigación en Catálisis
Ambiental y Energías Renovables



POLITÉCNICO COLOMBIANO
JAIME ISAZA CADAVID



III SIMPOSIO INTERNACIONAL 2022
CATÁLISIS AMBIENTAL Y ENERGÍAS RENOVABLES

CONSTANCIA

Alba Nelly Ardila Arias

Por la presentación **ORAL** del trabajo titulado:

“Desarrollo de catalizadores basados en hierro soportados en carbón derivado de llanta y su aplicación en la síntesis Fischer-Tropsch”

Organizado por:

El Grupo de Investigación en Catálisis Ambiental y Energías Renovables **CAMER**, de la Facultad de Ciencias Básicas, Sociales y Humanas.
Celebrado del 13 al 17 de junio de 2022 en la modalidad virtual en la Ciudad de Medellín, Colombia.

Cesar Iván Navarro Criado

Vicerrector de Extensión E,
Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid

Alba Nelly Ardila Arias

Líder Grupo de Investigación en Catálisis
Ambiental y Energías Renovables





Educación para *vivir mejor*



LA DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADOS:

Hace constar que:

Juan David Martínez Cañas

Identificado con cédula N° 1.128.472.662

Participó como ponente del proyecto

“Obtención de los componentes de un catalizador heterogéneo a partir de llantas residuales para el desarrollo de catalizadores de hierro”

Autores: Alba Nelly Ardila Arias, Erasmo Arriola Villaseñor, Rolando Barrera Zapata, Sebastián Amar Gil y Juan David Martínez Cañas

2° ENCUESTRO DE INVESTIGACIÓN 2021:
“*Investiga Poli, conociendo, aplicando y transformando*”

Medellín, 27 y 28 de octubre de 2021

GLORIA STELLA SÁNCHEZ ARANGO
Directora de Investigación y Posgrados

VICENTE ANTONIO GARCÍA QUINTERO
Vicerrector de Docencia e Investigación



DIA Comunicaciones



CONSTANCIA

Otorgada A:

Sebastián Amar Gila, Alba N. Ardila A, Rolando Barrera Zapata

Por la presentación **ORAL** del trabajo titulado:

“Síntesis y caracterización de sulfato ferroso heptahidratado a partir de alambre de acero reciclado de llantas usadas”

En el IV Simposio Internacional de Catálisis Ambiental y Energías Renovables (IV SICAMER-2024) *“Oportunidades y retos en la valorización de residuos para la obtención de materiales y la generación de energías renovables bajo el concepto de economía circular”*, realizado los días 28 al 31 de octubre de 2024, en su modalidad Mixta (Virtual y Presencial).

Luz Marina Ocampo Carmona
Presidente Comité Científico IV-SICAMER-2024
Universidad Nacional de Colombia

Alba Nelly Ardila Arias
Vicepresidente Comité Científico IV-SICAMER-2024
Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid



08

ALIANZAS

Hemos articulado capacidades técnico-científicas para conformar una Red REDVAR para proponer estrategias a nivel nacional e internacional en la valorización de residuos, creación de conciencia ambiental y procesos investigativos con un enfoque de economía circular.

POLITÉCNICO COLOMBIANO JAIME ISAZA CADAVID

REDVAR

- Red de valorización de Residuos-





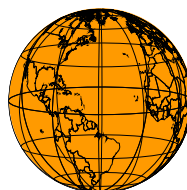
ASOCIACIONES, EMPRESAS Y ENTIDADES GUBERNAMENTALES

- Superintendencia de Servicios Públicos
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia
- Corporación Ruta N
- Corantioquia
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
- Asociación de Bananeros de Colombia - Augura
- Protecol S.A.C
- Gestión de Residuos, Unidades Residenciales
- Reecod S.A.S
- Dasein Circularidad
- Soluciones en Sostenibilidad y Polímeros, SOSPOL SAS
- Agropecuaria San Fernando, SAMIMAX Colombia
- Asociación Internacional para el Desarrollo Socioambiental
- RapiTerra Group S.A.S
- Grupo Arcoing S.A.S -PIRSA
- Green Delta S.A.S
- Geonatural S.A.S
- Fundación TU RIES
- Faro Tecnológico S.A.S
- Ekofuturista S.A.S. BIC
- Liliana Cosmetics
- CORNARE
- Contaminantes Orgánicos Persistentes
- Covatec
- Camacol Antioquia
- Biomastnest S.A.S, Soluciones Bioeconómicas
- Asociación de Recicladores Santuario
- Agrosavia
- 7 Vidas DeGato S.A.S BIC



ACADEMIA, UNIVERSIDADES

- Universidad Nacional de Colombia
- Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid
- Universidad de Antioquia
- Universidad de Guanajuato
- Tecnológico de Antioquia
- Universidad Pontificia Bolivariana
- Instituto Educativo Tomás Carrasquilla
- Universidad Industrial de Santander
- Universidad del Quindío
- Universidad de Medellín
- Universidad de la Costa
- Universidad Santo Tomás
- Universidad ECCI
- Institución Universitaria Colegio Mayor
- Universidad de Concepción
- Instituto Tecnológico de Chascomús
- Universidad Nacional de San Martín
- Universidad Estadio Rio de Janeiro
- Universidad de Oviedo
- Universidad de Sao Paulo
- Instituto Politécnico Nacional, Guanajuato
- Universidad de Oviedo
- Universidad de Sevilla



PAISES

- Colombia
- México
- Chile
- Argentina
- Brasil
- España



MESAS DE TRABAJO

- Educación Ambiental
- Residuos Industriales
- Residuos de Demolición y Construcción
- Residuos Agroindustriales y Agropecuarios
- Efluentes Industriales
- Residuos Peligrosos
- Residuos no Peligrosos
- Residuos Urbanos
- Políticas Públicas
- Gestión, Desarrollo e Innovación
- Tránsito de Conocimiento

CONCLUSIONES

09

El uso de hierro extraído de llantas de desecho para la síntesis Fischer-Tropsch no solo representa una alternativa económica y sostenible para la producción de hidrocarburos, sino que también contribuye a cerrar el ciclo de reciclaje de residuos. Con el continuo avance en la investigación y la optimización de estos catalizadores, se espera que esta tecnología sea una herramienta clave en la transición hacia procesos industriales más sostenibles. La obtención de catalizadores a base de hierro a partir de llantas residuales representa una solución innovadora para la reutilización de residuos, transformando materiales como el acero y el caucho en componentes clave para la síntesis de hidrocarburos. Este enfoque no solo mejora la eficiencia del proceso Fischer-Tropsch, sino que también contribuye a una economía circular al dar valor a residuos difíciles de manejar.

Los catalizadores a base de hierro, especialmente aquellos soportados en materiales carbonosos derivados de llantas, muestran una menor selectividad hacia productos no deseados, como el metano, mejorando la eficiencia del proceso Fischer-Tropsch. Sin embargo, la estabilidad y vida útil de estos catalizadores siguen siendo un desafío importante, lo que requiere más investigaciones para optimizar su rendimiento a largo plazo. La utilización de llantas residuales para la preparación de catalizadores ofrece grandes oportunidades tanto para la industria como para la sostenibilidad. Este enfoque no solo reduce la acumulación de residuos, sino que también proporciona una alternativa económica y ecológica frente a los materiales convencionales utilizados en la catálisis, alineándose con los objetivos globales de sostenibilidad y desarrollo responsable.

10

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid y al Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (Minciencias) por la financiación del proyecto de investigación “Valorización integral de residuos postconsumo e industriales para el desarrollo de materiales con potencial catalítico bajo un enfoque de economía circular.”, código 82312, aprobado en el marco de la Convocatoria No. 890 de 2020. Convocatoria para el fortalecimiento de CTel en Instituciones de Educación de Educación Superior (IES) Públicas 2020”.

REFERENCIAS

Amar-Gil, S., Ardila-Arias, A. N., & Barrera-Zapata, R. (2023). Obtaining and characterization of catalytic materials from waste tires for the Fischer-Tropsch process. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. <https://doi.org/10.1007/s10163-023-01591-1>

Amar-Gil, S., Ardila-Arias, A. N., & Barrera-Zapata, R. (2024). Obtención y caracterización de sulfato de hierro (II) heptahidratado a partir de alambre de acero proveniente de llantas residuales. *Investigación e Innovación en Ingenierías*. <https://doi.org/10.17081/invinno.11.2.6717>

C. Sathiskumar and S. Karthikeyan, "Recycling of waste tires and its energy storage application of by-products –a review," *Sustain. Mater. Technol.*, vol. 22, p. e00125, 2019, doi: 10.1016/j.susmat.2019.e00125.

I. Iraola-Arregui, P. Van Der Gryp, and J. F. Görgens, "A review on the demineralisation of pre- and post-pyrolysis biomass and tyre wastes," *Waste Manag.*, vol. 79, pp. 667–688, 2018, doi: 10.1016/j.wasman.2018.08.034.

M. Olazar, G. Lopez, M. Arabiourrutia, G. Elordi, R. Aguado, and J. Bilbao, "Kinetic modelling of tyre pyrolysis in a conical spouted bed reactor," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 81, no. 1, pp. 127–132, 2008, doi: 10.1016/j.jaap.2007.09.011.

M. Passaponti et al., "Recycling of waste automobile tires: Transforming char in oxygen reduction reaction catalysts for alkaline fuel cells," *J. Power Sources*, vol. 427, no. April, pp. 85–90, 2019, doi: 10.1016/j.jpowsour.2019.04.067.

Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo territorial, "Resolucion 1457 de 2010," D. Of. 47786 julio 30 2010, pp. 1–10, 2010.

R. Acosta, C. Tavera, P. Gauthier-Maradei, and D. Nabarlatz, "Production of oil and char by intermediate pyrolysis of scrap tyres: Influence on yield and product characteristics," *Int. J. Chem. React. Eng.*, vol. 13, no. 2, pp. 189–200, 2015, doi: 10.1515/ijcre-2014-0137.

W. Ruwona, G. Danha, and E. Muzenda, "A Review on Material and Energy Recovery from Waste Tyres," *Procedia Manuf.*, vol. 35, pp. 216–222, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2019.05.029.